طراحی و بررسی عددی جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله‌مویین به‌عنوان کنتور گاز خانگی*

سامان پرویزی[۱]   محمود فرزانه‌گرد[۲]   علی جباری مقدم[۳]   مجید هاشمیان[٤]   مهراب عقیلی بهرامی[۵]

چکیده *اندازه‌گیری دقیق شدت جریان جرمی گاز طبیعی همواره مسئلهٔ مهمی به‌ویژه در سطح مصارف خانگی بوده است. یکی از انواع جریان‌سنج‌های جرمی، جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله‌مویین می‌باشد که برای اندازه‌گیری جریان‌های با دبی پایین استفاده می‌شود. در این مطالعه شناخت پارامترهای مهم و تأثیر هر یک از این پارامترها در طراحی جریان‌سنج حرارتی لولهٔ مویین بررسی شده است. برای این کار مدل سه‌بعدی یک جریان‌سنج جرمی حرارتی لولهٔ مویین شبیه‌سازی و انتقال حرارت در لولهٔ حسگر آن به‌صورت عددی برای گاز متان به‌عنوان گاز طبیعی تحلیل شده است. برای اعتبارسنجی روش حل عددی، به‌دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان، از نیتروژن استفاده شده است که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج عددی نشان می‌دهد که عدم قطعیت این جریان‌سنج‌ها حداکثر ۱/۲٤ درصد است که برای کنتورهای خانگی قابل قبول می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی اندازه‌گیری جریان، جریان‌سنج حرارتی، انتقال حرارت سه‌بعدی، جریان‌سنج لوله‌مویین، کنتور گاز خانگی.

Designing and Numerical Analysis of Capillary Tube Thermal Mass Flowmeter for Residential Natural Gas Meter

S. Parvizi   M. Farzaneh-Gord   A. Jabari Moghadam   M. Hashemian   M. Aghili Bahrami

Abstract *Accurate natural gas measurement is an important issue especially in domestic usage level. Capillary tube thermal mass flow meter is one of the most common types of mass flow meters which are mostly used for low mass flow rates. In this work, a capillary tube flow meter was simulated numerically. A three-dimensional steady state heat transfer in its sensor tube was numerically analyzed and the sensitivity of this type of flow meter was investigated. In order to validate the simulation approach, the simulation was also accomplished for Nitrogen, for which experimental data was available in the literature, It is shown that the simulation result is reasonable. Considering all the possible effective parameters, the uncertainty of the flow meter was also calculated. Numerical results show that the maximum amount of uncertainty in measurement for this type of flow meter is less than 1.24% which is acceptable for residential customers.*

Key Words Flow metering, Thermal massflowmeter, Three-Dimensional heat transfer, Capillary tube mass flow meter, Residential Natural Gas Meter

*تاریخ دریافت مقاله ۹٤/۱۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/۱/۱۹ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، کارشناس ارشد، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه شاهرود، saman.parvizy@gmail.com
(۲) استاد، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه شاهرود.
(۳) دانشیار ، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه شاهرود.
(٤) استادیار، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه شاهرود.
(۵) کارشناس ارشد، شرکت گاز استان گلستان.

مقدمه

در بسیاری از صنایع، اندازه‌گیری جریان جرمی بر اندازه‌گیری جریان حجمی برتری دارد. دو شیوه برای اندازه‌گیری جریان جرمی وجود دارد. در روش اول جریان حجمی اندازه‌گیری و نتیجه در چگالی ضرب می‌شود. جریان‌سنج‌هایی که با این روش کار می‌کنند ابزار اضافی مانند حسگر فشار و دما لازم دارند تا جریان جرمی را محاسبه نمایند. برخلاف این مدل، جریان‌سنج‌های نوع دوم جریان جرمی را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند که تغییرات فشار و دمای ورودی تأثیر ناچیزی بر آن دارد. جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به این دسته تعلق دارند.

اندازه‌گیری دقیق جریان گاز طبیعی کار دشواری می‌باشد؛ دلیل اصلی آن تراکم‌پذیر بودن سیال است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان حجمی واقعی وجود دارد اما جریان اندازه‌گیری‌شده با تغییرات دما و فشار تغییر می‌کند. به‌همین‌دلیل در تمام فرایندهای صنعتی تمایل به اندازه‌گیری جریان جرمی به‌جای جریان حجمی وجود دارد.

یکی از وسایل اندازه‌گیری مستقیم جریان جرمی جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی می‌باشد [1]. جریان‌سنج‌های دیافراگمی که یکی از انواع جریان‌سنج‌های جابه‌جایی مثبت است رایج‌ترین نوع وسیلهٔ اندازه‌گیری در صنعت گاز به‌ویژه مصارف خانگی است. جریان‌سنج‌های دیافراگمی، جریان حجمی گاز طبیعی را با شمارش تعداد دفعات پر و خالی شدن حجم ثابتی اندازه‌گیری می‌کنند [2]. به‌رغم مزایای این جریان‌سنج‌ها همچون قیمت پایین، محدودیت‌هایی نظیر قطعات متحرک، این نوع جریان‌سنج‌ها را نیازمند تعمیرات دوره‌ای می‌کند. اما عیب اصلی جریان‌سنج‌های دیافراگمی این است که در جریان‌های پایین مانند مصارف خانگی خطای آن بسیار زیاد است. به‌علاوه اینکه این نوع جریان‌سنج‌ها جریان حجمی را اندازه می‌گیرند. عدم دقت کنتورهای خانگی گاز طبیعی یکی از دلایل عمدهٔ گم شدن گاز طبیعی در شبکهٔ توزیع گاز می‌باشد [4, 5]. مقدار گاز گم‌شده در شبکهٔ توزیع گاز طبیعی ایران در سال ۲۰۱۳، حدود نه میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است [5].

جریان‌سنج جرمی حرارتی بااستفاده از انرژی گرمایی جریان جرمی را اندازه‌گیری می‌کند بدین‌صورت که گرما توسط یک گرم‌کن به جریان سیال داده می‌شود و بااستفاده از مقدار گرمای داده‌شده و اختلاف دمای ایجادشده که به‌کمک دو حسگر دما محاسبه می‌شود جریان اندازه‌گیری می‌شود. این نوع جریان‌سنج برای گازها بهترین کارایی را دارد زیرا ایجاد اختلاف دمای زیاد در مایعات به‌دلیل ملاحظات مربوط به ظرفیت گرمایی بالا مشکل است [6]. بنابراین برای سنجش جریان مایعات، طراحی خاص همراه با هزینهٔ بالا لازم است. علاوه‌براین به‌دلیل آنکه سنجش به‌وسیلهٔ حسگرها به‌صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد این نوع جریان‌سنج‌ها اطلاعاتی درمورد جریان به ما نمی‌دهند. جریان‌سنج جرمی حرارتی به دو نوع جریان‌سنج جرمی حرارتی شناور و لوله‌مویین تقسیم می‌شود. اگرچه هر دو نوع از انرژی حرارتی برای اندازه‌گیری جریان استفاده می‌کنند اما اصول کارکرد آنها کاملاً متفاوت است. در مدل لولهٔ مویین سطح گرم‌شده لوله مویینی است که انرژی را به حجم سیال منتقل می‌کند اما در جریان‌سنج‌های شناور سطح گرم‌شده سطح خارجی لولهٔ استوانه‌ای است که انرژی حرارتی را به لایهٔ مرزی لزج پیرامون استوانه منتقل می‌کند [7].

در مبحث اندازه‌گیری جریان، روش‌های متعدد و بسیاری وجود دارد که بسته به فرایند، خصوصیات سیال مورداستفاده، فشار و به‌خصوص دقت موردنیاز یکی از آنها را می‌توان برای اندازه‌گیری انتخاب کرد. فیکو [2] بااستفاده از مطالعات آزمایشگاهی وسیعی نشان می‌دهد که به‌دلیل مدت زمان استفاده، شرایط

نصب و تکنولوژی ساخت، جریان‌سنج‌های دیافراگمی در گذر زمان خطای زیادی را ایجاد می‌کند. به‌همین دلیل تمایل‌به استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری با کارایی بهتر، روزبه‌روز بیشتر می‌شود. باید درنظر داشت که برای اندازه‌گیری جریان‌های بالاتر از مصارف خانگی در سال‌های اخیر از جریان‌سنج‌هایی مانند جریان‌سنج‌های فراصوت، صفحه روزنه‌ای و توربینی برای اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی استفاده شده است [1].

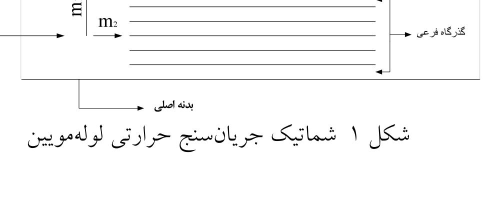
یکی دیگر از وسایل اندازه‌گیری که به‌صورت وسیعی در اندازه‌گیری جریان جرمی استفاده می‌شود جریان‌سنج جرمی حرارتی است. شکل (۱) یک طرح‌واره از این نوع جریان‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. کومیا و همکاران [8] حل یک‌بعدی برای انتقال حرارت لولهٔ حسگر جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله‌مویین ارائه کردند. در این مطالعه آنها از تغییرات دما در جهت شعاعی صرف‌نظر کردند و شرایط حرارتی سیال را ثابت فرض کردند. هینکل [9] از یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی پدیدهٔ انتقال حرارت در لولهٔ حسگر استفاده کردند. آنها فرض کردند که جریان در لولهٔ حسگر ازنظر حرارتی و هیدرودینامیکی کاملاً توسعه یافته است. کیم و جنگ [10] برهم‌کنش انتقال حرارت بین دیوار و سیال در لولهٔ حسگر را از نظر عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها هم‌چنین انتقال حرارت پایا و گذرا را در لولهٔ حسگر و همچنین حساسیت جریان‌سنج را بررسی کردند [12-14]. ویزواناتان و همکاران [14] مدلی از جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی را برای فشارهای بالا (۱۸bar و ۱۹/۵bar) برای اندازه‌گیری جریان هوا طراحی کردند. ساژین [16] و بیکر و گیمسون [17] برای اندازهٔ جریان هوا در خودرو جریان‌سنج جرمی حرارتی را طراحی و حل تحلیلی حسگرها را به‌دست آوردند. بیکر و گیمسون [17] تأثیرات روش ساخت بر دقت جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی شناور را بررسی کردند. بارتوس [18] گزارش کرد که اندازه‌گیری دقیق جریان بستگی به غیرمغشوش بودن جریان دارد.

جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین

جریان‌سنج‌های حرارتی براساس روش محاسبهٔ انرژی تلف‌شده به دو نوع جریان ثابت و اختلاف دما ثابت تقسیم می‌شوند. در مدل اختلاف دما ثابت، جریان جرمی براساس مقدار انرژی گرمایی لازم برای ثابت نگه‌داشتن اختلاف دمای دو حسگر دما محاسبه می‌شود [19]. در نوع دیگر، که در این مطالعه بررسی شده است، انرژی گرمایی ثابت می‌باشد و جریان جرمی تابعی از اختلاف دمای ایجادشده بین دو حسگر در انرژی گرمایی ثابت است [20].

اصول کارکرد

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است این نوع جریان‌سنج از سه قسمت بدنهٔ اصلی، لولهٔ حسگر و گذرگاه فرعی تشکیل شده است. براین‌اساس کل جریان جرمی در خط فرایند وارد بدنهٔ اصلی جریان‌سنج می‌شود و سپس به دو مسیر جدا تقسیم می‌شود. قسمتی از جریان وارد لولهٔ حسگر می‌شود ($\dot{m}_1$) و قسمتی از گذرگاه‌های فرعی عبور می‌کند ($\dot{m}_2$). گذرگاه فرعی آرام‌ساز جریان می‌باشد که علاوه‌بر این کار افت فشاری ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مقداری از جریان از لولهٔ حسگر عبور کند. معمولاً $\dot{m}_1$ خیلی کوچک‌تر از $\dot{m}_2$ است. کل جریان جرمی برابر جمع جریان‌های دو مسیر می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (1)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_1\left(1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}\right) = c\dot{m}_1 \quad (2)$$

عبارت $(1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1})$ را نسبت گذرگاه فرعی می‌نامند. در اینجا نشان داده می‌شود اگر جریان در گذرگاه فرعی کاملاً آرام باشد نسبت گذرگاه فرعی مقداری ثابت است. به‌همین‌دلیل گذرگاه فرعی باید نقش آرام‌ساز داشته باشد و نمی‌تواند روزنه‌ای یا اختلاف فشاری باشد.

افت فشار در طول لولهٔ حسگر مویین از رابطهٔ (۳) برای لولهٔ استوانه‌ای با جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته به‌دست می‌آید [21].

$$\Delta P_{sensor} = C_{tube}\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\dot{m}_1 \quad (3)$$

اگر گذرگاه فرعی از N لولهٔ مویین با قطر داخلی و طول یکسان با لولهٔ حسگر تشکیل شده باشد و شبیه لولهٔ حسگر، جریان در آن آرام و کاملاً توسعه‌یافته باشد، افت فشار در طول این آرام‌ساز برابر است با:

$$\Delta P_{sensor} = \Delta P_{bypass} \rightarrow C_{tube}\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\dot{m}_1 = \left(\frac{C_{tube}}{N}\right)\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\dot{m}_2 \rightarrow \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = N$$

بنابراین:

$$\text{bypass ratio} = N + 1\dot{m} = \dot{m}_1(1+N) = \text{Constant}.\dot{m}_1 \quad (4)$$

این رابطه برای انواع گذرگاه فرعی، صرف‌نظر از هندسه، در صورت آرام و کاملاً توسعه‌یافته بودن توزیع سرعت در آن، صدق می‌کند. رابطهٔ (٤) اصل اساسی در جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی را بیان می‌کند زیرا نشان می‌دهد که نسبت گذرگاه فرعی مستقل از تمام خواص گاز مقداری ثابت است و اندازه‌گیری مستقیم جریان عبوری از لولهٔ حسگر، جریان کل عبوری در خط فرایند را بدون درنظر گرفتن تغییرات دما و فشار ورودی نتیجه می‌دهد.

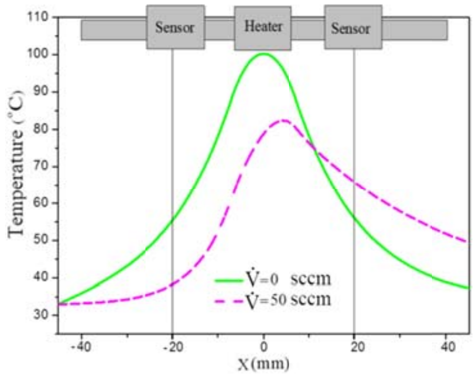
اگر برای گذرگاه فرعی از یک عنصر اختلاف فشاری مانند روزنه، شیپوره یا ونتوری استفاده کنیم در این مورد نسبت گذرگاه ثابت نیست و به لزجت گاز و جریان عبوری لولهٔ حسگر وابسته می‌باشد. هر دوی این وابستگی‌ها منجر به خطای اندازه‌گیری می‌شود.

مشخصات جریان در لولهٔ حسگر:

- جریان باید کاملاً آرام و توزیع سرعت کاملاً توسعه‌یافته باشد.
- جریان تراکم‌ناپذیر باشد.

همچنین فرض می‌شود جریان در حالت پایا و خواص گاز و مواد لولهٔ حسگر ثابت هستند. دمای لولهٔ حسگر در عرض ضخامت لوله ثابت و دمای گاز، دمای میانگین در سطح مقطع لوله می‌باشد. این فرضیات برای لولهٔ بلند با ضخامت کم لولهٔ مویین با جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته درست می‌باشد [22].

برای برقراری جریان آرام عدد رینولدز باید کمتر از ۲۰۰۰ باشد. در شبیه‌سازی بیشینه عدد رینولدز ۱۰۳/٤ می‌باشد که مربوط به لوله‌های مویین است. اصول کار جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین براساس قوانین اول ترمودینامیک و انتقال حرارت می‌باشد. جریان عبوری از لولهٔ حسگر به‌وسیلهٔ دو حسگر دما که به طور متقارن نسبت به مرکز قرار گرفته‌اند و یک گرم‌کن که در مرکز قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. گرما به‌وسیلهٔ گرم‌کن به جریان عبوری از لولهٔ حسگر داده می‌شود؛ همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است در نبود جریان، حسگرها توزیع دمای متقارن را نشان می‌دهند. اما وقتی سیال در لولهٔ حسگر جریان می‌یابد در بالادست جریان گرما از لولهٔ حسگر به سیال و در پایین‌دست جریان از سیال به لولهٔ حسگر منتقل می‌شود که باعث ایجاد اختلاف دما بین حسگرها خواهد شد [12].



شکل ۲ طرح‌وارهٔ لولهٔ حسگر و تعریف اختلاف دمای بین دو حسگر

این اختلاف دما در دامنهٔ خاصی با افزایش جریان به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، ازاین‌رو در این دامنه جریان عبوری از لولهٔ حسگر رابطهٔ مستقیمی با اختلاف دمای دو حسگر دارد که این نسبت برای هر جریان‌سنج باید محاسبه شود. شکل (۳) بازهٔ خطی جریان‌سنج حرارتی را نشان می‌دهد.

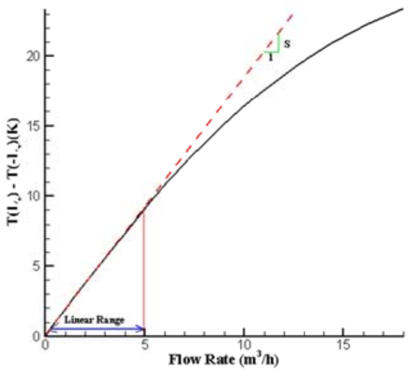
بنابراین، این دامنهٔ خطی یکی از پارامترهای مهم در طراحی جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی لوله‌مویین است زیرا افزایش دامنهٔ خطی باعث امکان اندازه‌گیری جریان بیشتر می‌شود.

حساسیت

یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی جریان‌سنج‌های حرارتی لوله‌مویین حساسیت جریان‌سنج می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشخص است حساسیت به‌صورت مشتق اختلاف دما نسبت به جریان در جریان صفر تعریف می‌شود [13]:

$$S = \frac{\partial\left(T_{\text{sensor tube}}(L_S) - T_{\text{sensor tube}}(-L_S)\right)}{\partial \dot{m}} \qquad (۵)$$

با کاهش حساسیت، نسبت اختلاف دما به جریان جرمی کاهش می‌یابد. اگر اختلاف دما از دقت اندازه‌گیری حسگر کوچک‌تر شود جریان‌سنج حرارتی نمی‌تواند جریان عبوری را اندازه‌گیری کند. بنابراین هرچه حساسیت بالاتر باشد دقت اندازه‌گیری بهتر است.



شکل ۳ تعریف بازهٔ خطی و حساسیت جریان‌سنج

حل عددی معادلات حاکم

رابطهٔ (٦) معادلهٔ سه‌بعدی پیوستگی را برای سیال عبوری از لولهٔ حسگر بیان می‌کند که در آن u و v و w سرعت سیال به‌ترتیب در جهت‌های x و y و w را نشان می‌دهد [21].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (٦)$$

رابطه‌های (۷-۹) شکل سه‌بعدی معادلهٔ تکانه را برای حالت پایا درجهت‌های **x** و **y** و **z** نشان می‌دهد؛ **p**، **v**، **ρ** و **g** به‌ترتیب فشار، لزجت سینماتیکی، چگالی و شتاب جاذبه می‌باشند [21].

$$u\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) + w\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad (۷)$$

$$u\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + v\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) + w\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + g \qquad (۸)$$

$$u\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)+v\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)+w\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (۹)$$

معادلهٔ (۱۰) معادلهٔ انرژی را نشان می‌دهد.

$$u\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+v\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)+w\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{k}{\rho C_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{q}{\rho C_p} \quad (۱۰)$$

در این معادله k و C_p به‌ترتیب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی در فشار ثابت سیال، T دمای سیال و q شدت تولید حرارت در سیال است.

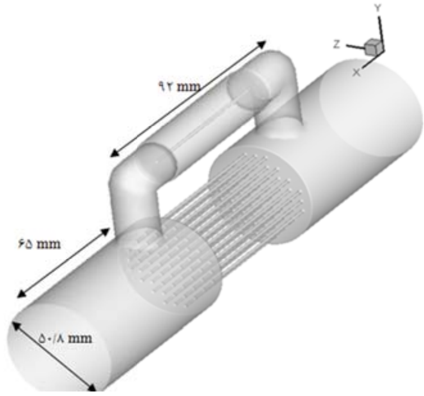
گسسته‌سازی معادلات به‌روش حجم محدود انجام و معادلات بااستفاده از نرم‌افزار فلوئنت ۶.۳.۲۶ حل شده است.

مدل‌سازی

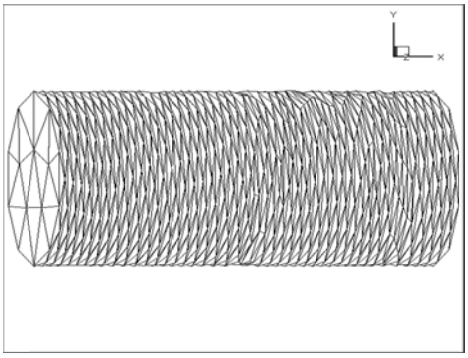
باتوجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق، طراحی یک جریان‌سنج برای استفاده در صنعت گاز به‌عنوان کنتور گاز خانگی می‌باشد، قطر ورودی جریان‌سنج برابر قطر لولهٔ ورودی کنتورهای شرکت گاز و برابر با ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی‌متر) درنظر گرفته شده است. قطر لوله‌های مویین استفاده‌شده در این مدل‌سازی براساس لوله‌های موجود طراحی شده است. در شکل (٤) مشخصات کلی مسئله نشان داده شده است.

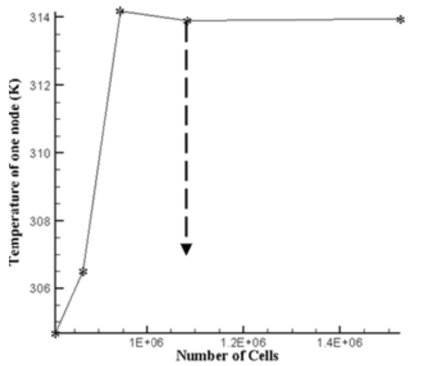
بررسی استقلال از شبکه

ازآنجاکه در تحلیل میدان جریان، وابستگی حل به شبکهٔ محاسباتی باید ارزیابی شود، شبکه‌های ریز و درشت مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در شبیه‌سازی سه‌بعدی برای نمونهٔ هندسهٔ جریان‌سنج با قطر لولهٔ حسگر ۱/٤٥ میلی‌متر از ۱,۰٤٤,۸۰۸ سلول تشکیل شده که در شکل (٦) نمودار استقلال از شبکه آورده شده است.



شکل ٤ مدل سه‌بعدی جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین


شکل ٥ نمونه مش‌بندی سه‌بعدی لولهٔ حسگر



شکل ٦ نمودار استقلال از شبکه برای مدل سه‌بعدی

انتخاب حلگر و مدل فیزیکی

بعد از اینکه شبکه و هندسهٔ مسئله وارد نرم‌افزار فلوئنت شد باید شبکه ازنظر ابعاد و مقیاس مناسب بررسی شود و حل‌کننده و مدل فیزیکی مناسب انتخاب شود. جدول (۱) نوع حلگر و مدل فیزیکی انتخاب‌شده در نرم‌افزار فلوئنت را نشان می‌دهد.

جدول ۱ حل‌گر و مدل فیزیکی انتخاب‌شده

panel	Subtitle	Selected
Solver	Solver	Pressure based
	Formulation	Implicit
	Space	3D
	Time	Steady
Energy	Energy Equation	Active
Viscous	Model	Laminar

در بیشتر موارد بیش از ٪۹۰ کسر حجمی گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد [23]. بنابراین متان نزدیکترین رفتار را به گاز طبیعی دارد؛ به همین دلیل ابتدا گاز متان به‌عنوان سیال مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین جنس بدنه اصلی جریان‌سنج از فولاد و جنس عایق از پشم سنگ درنظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی این مواد در جدول (۲) آمده است.

جدول (۳) شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد. شار حرارتی برابر (w/m^2) ۱۵۰۰ درنظر گرفته شده است.

جدول ۲ مشخصات مواد استفاده شده در هندسه مدل‌شده

ماده	مشخصات			
	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت $(J/kg.K)$	ضریب هدایت حرارتی $(W/m.K)$	ویسکوزیته $\times 10^{-5}$ $(kg/m.s)$
متان	۰/۶۵۳۶	۲۲۲۲	۰/۰۳۳۲	۱/۰۸۷
فولاد	۸۰۳۰	۵۰۲/۴۸	۱۶/۲۷	-----
پشم سنگ	۵۰	۸۴۰	۰/۰۹۲۷	-----

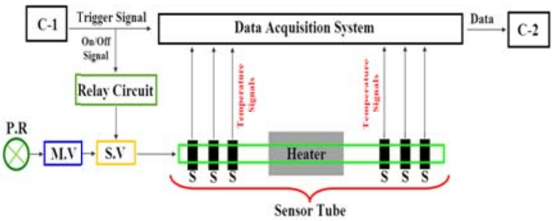
جدول ۳ شرایط مرزی اعمال شده بر مسئله

مرز	شرایط مرزی
ورودی	سرعت ثابت
خروجی	فشار خروجی
لولهٔ حسگر	شار حرارتی ثابت انتقال حرارت جابه‌جایی عایق حرارتی

اعتبارسنجی

به‌دلیل نبود داده‌های آزمایشگاهی برای متان به‌عنوان سیال عامل، از داده‌های آزمایشگاهی نیتروژن که توسط کیم و همکاران [12] گزارش شده است برای اعتبارسنجی روش عددی استفاده شده است. با توجه به اینکه رفتار هر دو گاز متان و نیتروژن در فشارهای پایین شبیه رفتار گاز ایده‌آل است، این مقایسه می‌تواند قابل قبول باشد.

شکل (۷) مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط کیم و همکاران را نشان می‌دهد [12]. در این مدل از لوله مویینی از جنس فولاد ضدزنگ به طول ۹۱ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۷ مدل آزمایشگاهی انجام‌شده توسط کیم و همکاران [12]
C: رایانه, P.R: تنظیم کننده فشار, M.V: شیر اندازه‌گیری,
S.V: شیر, S: حسگر دما

در مدل ارائه شده توسط کیم تمام جریان از لوله مویین عبور می‌کند. در جدول (٤) مشخصات هندسی لولهٔ حسگر ساخته شده توسط کیم و همکاران آورده شده است.

جدول ٤ مشخصات هندسی مدل کیم و همکاران

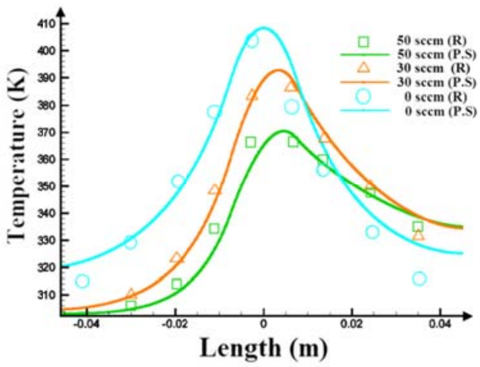
طول لولهٔ حسگر	91mm
قطر داخلی لولهٔ حسگر	0.977mm
قطر خارجی لولهٔ حسگر	1.257mm
طول گرمکن	14.8mm

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی عددی را در مقابل داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط کیم و همکاران نشان می‌دهد. داده‌های آزمایشگاهی توزیع

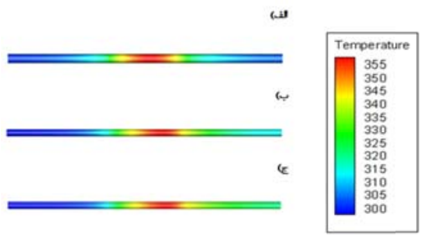
دما برای سه جریان مختلف ۰ ، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه را گزارش می‌کنند. براساس شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی به دمای اندازه‌گیری‌شده بسیار نزدیک می‌باشد اگرچه در ابتدا و انتهای لولهٔ حسگر تفاوت‌هایی دیده می‌شود. این تفاوت‌ها ناشی از تأثیر شرایط مرزی می‌باشد. در شبیه‌سازی، جریان ورودی به‌صورت یکنواخت و کاملاً توسعه‌یافته بررسی شده است، درصورتیکه در عمل در ابتدا و انتهای لولهٔ حسگر چنین شرایطی برقرار نیست. البته این انحراف از مقدار واقعی نمی‌تواند بر دقت جریان‌سنج تأثیر بگذارد زیرا آنچه در اندازه‌گیری جریان توسط جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین اهمیت دارد اختلاف دمای اندازه‌گیری‌شده به‌وسیلهٔ دو حسگر می‌باشد که در مکان $L_s = \pm 7.5mm$ قرار دارد و همان‌گونه که در نمودار مشخص است اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در این نقطه ناچیز است.

نتایج

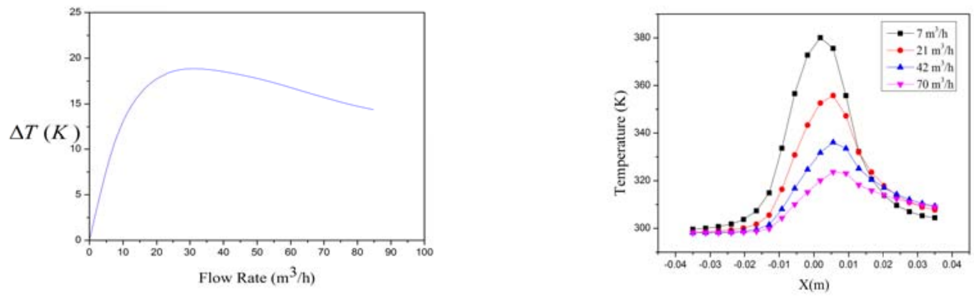
شکل (۹) توزیع دما برای سه جریان مختلف را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش جریان حرارت از بالادست جریان به‌سمت پایین‌دست جریان منتقل می‌شود. در شکل‌های (۱۲-۱۰) قسمت (الف) توزیع دما در طول لولهٔ حسگر و قسمت (ب) اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج را برای سه هندسهٔ بررسی‌شده نشان می‌دهد.



شکل ۸ مقایسهٔ توزیع دما در طول لولهٔ حسگر برای داده‌های آزمایشگاهی (R) و حل عددی (P.S)

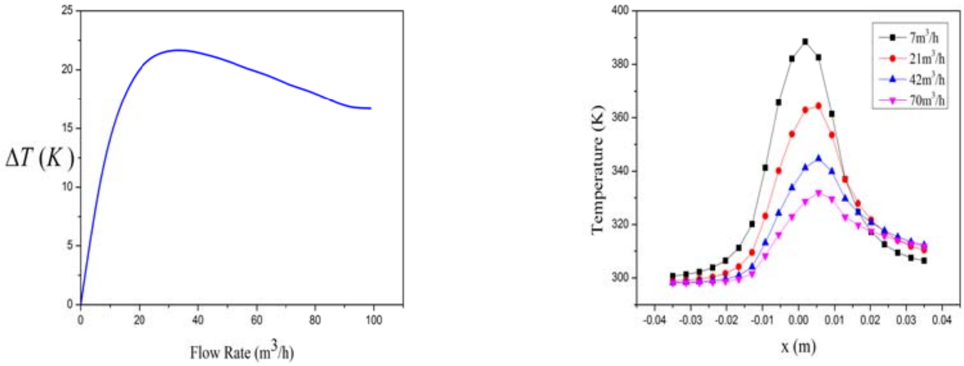


شکل ۹ توزیع دما در لولهٔ حسگر با قطر ۱/۸ میلی‌متر برای
الف) جریان ۹۱/٦ سانتی‌متر مکعب بر ساعت
ب) جریان ٤٥٨ سانتی‌متر مکعب بر ساعت
ج) جریان ۹۱٦ سانتی‌متر مکعب بر ساعت



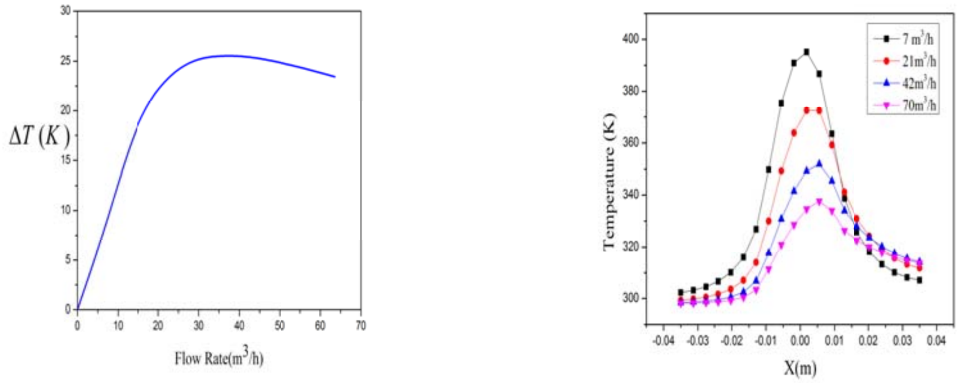
الف	ب

شکل ۱۰ الف) توزیع دما در طول لولهٔ حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج
(Din=1mm, Dout=1.2mm, L=37.5mm, Ls=20mm)



الف ب

شکل ۱۱ الف) توزیع دما در طول لولۀ حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج
(Din=1.4mm, Dout=1.6mm, L=37.5mm, Ls=20mm)



الف ب

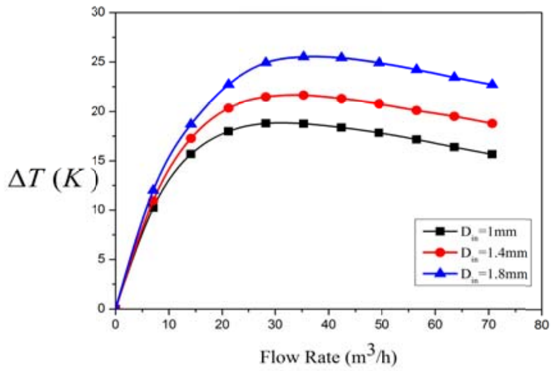
شکل ۱۲ مشخصات لولۀ حسگر $D_{in} = 1.8mm, D_{out} = 2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$
الف) توزیع دما در طول لولۀ حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج

در این مطالعه تأثیر پارامترهای طراحی در حالت سه‌بعدی بررسی شده است. در شکل (۱۳) تأثیر قطر لولۀ حسگر بر اندازه‌گیری جریان نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش قطر لولۀ حسگر باعث کاهش دامنۀ کاری و افزایش حساسیت جریان‌سنج می‌شود. همچنین در شکل (١٤) دامنۀ کاری جریان‌سنج و حساسیت جریان‌سنج برای سه طول لولۀ حسگر متفاوت بررسی شده است که نشان می‌دهد طول لولۀ حسگر تأثیر چندانی بر دامنۀ کاری و حساسیت ندارد. شکل (١٥) تأثیر تفاوت مکان حسگر را نشان می‌دهد. باتوجه به این نمودار مکان حسگر بر دامنۀ کاری جریان‌سنج تأثیری ندارد، اما هرچه حسگر به مرکز لوله نزدیک‌تر باشد حساسیت جریان‌سنج افزایش می‌یابد. باتوجه‌به شکل (۱۳) تنها جریان‌سنج با قطر داخلی لولۀ حسگر ۱ میلی‌متر می‌تواند جایگزین کنتورهای خانگی G6 که در بازۀ کاری ٦/١ تا ١٠ متر مکعب بر ساعت کار می‌کند گردد و بازۀ خطی با قطرهای بیشتر، دامنۀ کاری این نوع کنتورها را پوشش

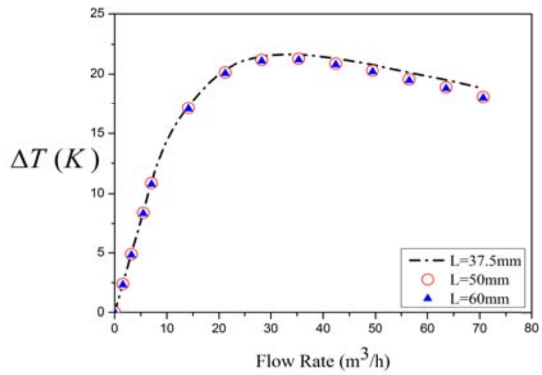
نمی‌دهد. شکل (١٦) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در بازهٔ ۰ تا ۱۰ مترمکعب بر ساعت رفتار نمودار را می‌توان با یک نمودار خطی تخمین زد. بنابراین در این بازه می‌توان از تابع خطی کالیبره‌شده برای محاسبهٔ جریان برحسب اختلاف دما استفاده کرد. باتوجه‌به نمودار حداکثر اختلاف دما در جریان ۱۰ مترمکعب بر ساعت برابر ۱۳ کلوین می‌باشد. بنابراین ضریب معادلهٔ خطی جریان حجمی برحسب اختلاف دما برابر ۰/۷٦۹۲ به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن رابطهٔ جریان جرمی کافیست ضریب به‌دست آمده در چگالی متان در شرایط ورودی، یعنی $P = 1atm, T = 298K$ ضرب شود.

با بررسی شکل (١٦) واضح است که خطایی به‌دلیل تخمین مقدار جریان جرمی با معادلهٔ خط به وجود می‌آید. شکل (١٧) درصد این خطا را برحسب جریان جرمی نشان می‌دهد. واضح است که مقدار این خطا تا جریان حجمی ۱۰مترمکعب بر ساعت ناچیز و حداکثر حدود ۰/۷٪ و خطای میانگین حدود ۰/۳ ٪ می‌باشد.

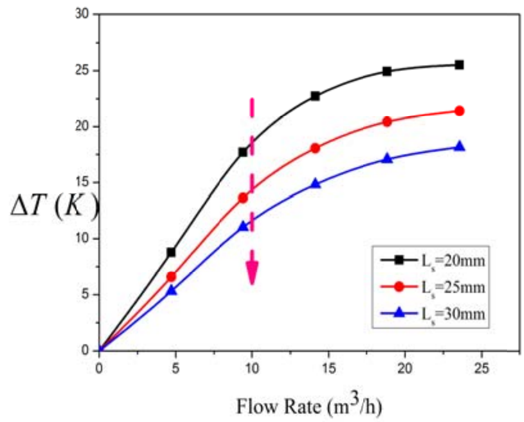
$$\dot{m} = 0.7692 \times 0.6536 \times \Delta T = 0.5027\Delta T \quad (۱۱)$$



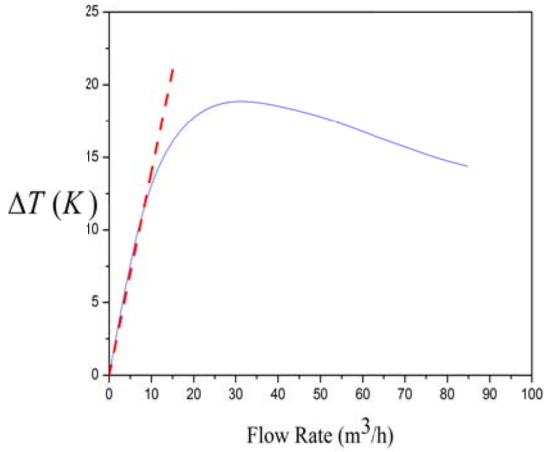
شکل ۱۳ مقایسهٔ بازهٔ خطی و حساسیت جریان‌سنج برای قطرهای متفاوت لولهٔ حسگر
($L=37.5$ mm, $L_s=20$ mm)



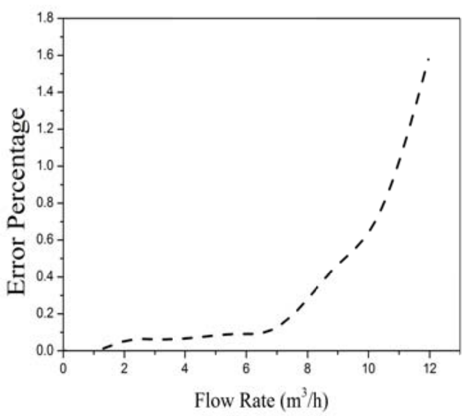
شکل ١٤ مقایسهٔ نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان برای طول‌های مختلف لولهٔ حسگر با قطر ۱ میلی‌متر



شکل ۱۵ مقایسهٔ نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان برای سه مکان حسگر متفاوت برای لولهٔ حسگر با قطر ۱/۸ میلی‌متر



شکل ١٦ بازهٔ خطی برای هندسهٔ انتخاب‌شده



شکل ۱۷ درصد خطای ایجادشده به‌دلیل تخمین نمودار با معادلهٔ خط

عدم قطعیت در اندازه‌گیری

عدم قطعیت در اندازه‌گیری جریان در جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به‌دلیل دقت حسگرهای استفاده‌شده و اختلاف توان اسمی و واقعی گرم‌کن می‌باشد. در این مطالعه دقت اندازه‌گیری حسگرها برابر ۰/۱°C و اختلاف توان اسمی و واقعی گرم‌کن برابر ۰/۱ W فرض شده است. در این مطالعه از روش کلاین–مک‌کلینتوک [24] برای محاسبهٔ عدم‌قطعیت استفاده شده است. براساس این روش مقدار عدم‌قطعیت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pm F=\left(\left(\frac{dF}{dx_1}\varepsilon_1\right)^2+\left(\frac{dF}{dx_2}\varepsilon_2\right)^2+\cdots\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه F کمیتی است که اندازه‌گیری می‌شود، x کمیت‌های تأثیرگذار در کمیت اندازه‌گیری‌شده و ε دامنهٔ تغییرات مربوط به هر کمیت تأثیرگذار می‌باشد.

در رابطهٔ (۱۳) $\boldsymbol{p_h}$ توان گرم‌کن می‌باشد. برای محاسبهٔ $\frac{d\dot{m}}{dp_h}$ مسئله برای ۰/۱ وات بالاتر و پایین‌تر از توان اسمی گرم‌کن حل شده است و سپس در یک دمای ثابت مقدار $\frac{d\dot{m}}{dp_h}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار $\frac{d\dot{m}}{d(\Delta T)}$ از معادلهٔ خطی رابطهٔ (۱۱) به‌دست آمده است.

$$\begin{cases} F=\dot{m} \\ x_1=\Delta T \rightarrow \dfrac{d\dot{m}}{d(\Delta T)}=0.5027 \\ \quad \varepsilon_1=0.1℃ \end{cases} \quad \begin{cases} F=\dot{m} \\ x_2=p_h \rightarrow \dfrac{d\dot{m}}{dp_h}=0.01 \\ \quad \varepsilon_2=0.1W \end{cases} \quad \begin{cases} F=\dot{m} \\ x_3=c \rightarrow \dfrac{d\dot{m}}{dc}=13 \\ \quad \varepsilon_3=0.003 \end{cases} \qquad (۱۳)$$

بنابراین عدم قطعیت جریان جرمی و درصد آن برابر است با:

$$\pm\dot{m}=(2\times(0.5027\times0.1)^2+(0.01\times0.1)^2+(13\times0.003)^2)^{\frac{1}{2}}=0.0811\ kg/h \qquad (۱٤)$$

$$\left({}^{0.0811}/_{6.536}\right)\times100=1.24\% \qquad (۱٥)$$

مقدار عددی عدم قطعیت نشان می‌دهد که این نوع جریان‌سنج‌ها برای جریان‌های پایین در صنعت گاز می‌توانند با دقت بسیار خوبی مورداستفاده قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این تحقیق، طراحی یک جریان‌سنج جرمی لوله‌مویین برای استفاده به‌عنوان کنتور گاز خانگی بوده است. همچنین در این مطالعه، شناخت پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد جریان‌سنج جرمی لوله‌مویین مد نظر قرار گرفته است و تأثیر هر یک از این پارامترها در طراحی جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین بررسی شده است. برای این کار مدل سه‌بعدی یک جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله‌مویین، شبیه‌سازی و انتقال حرارت در لولهٔ حسگر آن به‌صورت عددی برای گاز متان به‌عنوان گاز طبیعی تحلیل شده است. با درنظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار، عدم قطعیت جریان‌سنج محاسبه شده است. برای اعتبارسنجی روش حل عددی به‌دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان، از نیتروژن برای مقایسه استفاده شده است که تطابق قابل‌قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. با شبیه‌سازی و حل عددی جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش قطر لولهٔ حسگر، دامنهٔ خطی جریان‌سنج کاهش و حساسیت آن افزایش می‌یابد.
- کاهش طول لولهٔ حسگر در دامنهٔ خطی و حساسیت جریان‌سنج تأثیر ناچیزی دارد.
- تغییرمکان حسگر بر دامنهٔ کاری جریان‌سنج

تأثیری ندارد اما کاهش فاصله حسگر از مرکز لوله باعث افزایش دقت می‌شود.

جریان‌سنج‌های حرارتی لوله‌مویین برای اندازه‌گیری جریان‌های پایین استفاده می‌شوند. این نوع جریان‌سنج‌ها به‌دلیل اندازه‌گیری جریان جرمی، بسیار دقیق‌تر از جریان‌سنج‌های حجمی هستند؛ ازاین‌رو به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که این جریان‌سنج‌ها با دقت خیلی خوبی در شبکهٔ توزیع خانگی گاز طبیعی که در جریان‌های پایین کار می‌کنند قابل استفاده هستند.

تشکر و قدردانی

این مطالعه از حمایت شرکت گاز استان گلستان بهره‌مند شده است.

فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع لولهٔ حسگر (m^2)
C	ضریب ثابت
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (kJ/kg-K)
D_{in}	قطر داخلی لولهٔ حسگر (m)
D_{out}	قطر خارجی لولهٔ حسگر (m)
F	ضریب عدم قطعیت
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
K	ضریب هدایت حرارتی (kJ/m-K)
L	نصف طول لولهٔ حسگر (m)
L_s	مکان حسگر برروی لولهٔ حسگر (m)
$\dot{m}$	جریان جرمی (kg/h)
N	تعداد لوله‌های آرام‌ساز جریان
P	فشار (kPa)
ΔP	افت فشار (kPa)
q	شدت حرارت تولیدی (w/m^2)
S	حساسیت جریان‌سنج (K.h/kg)
ΔT	اختلاف دمای بین دو حسگر (K)
T	دما (K)

علائم یونانی

μ	لزجت (Pa.s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2/s)

مراجع

1. Hiismaeki, P., "Method and device for monitoring of a gas flow, in particular of a natural-gas flow", 08-Jul-1993, Internatinal Patent NumberWO1993013414.
2. Ficco, G., "Metrological performance of diaphragm gas meters in distribution networks", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 37, pp. 65–72, (2014).
3. Chapman, N.R. and Etheridge, D.W., "A step change in domestic metering technology from leather diaphragms to ultrasonics", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 5, No. 2, pp. 141–142, (1994).
4. Vasconcelos, C.D., Lourenço, S.R., Gracias, A.C. and Cassiano, D.A., "Network flows modeling applied to the natural gas pipeline in Brazil", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 14, pp. 211–224, (2013).
5. "http://www.irna.ir/fa/News/81845037", acessed 18/4/2017
6. Cubukcu, A.S., Romero, D.F.R. and Urban, G.A., "A dynamic thermal flow sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity and flow velocity of gases", *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 208, pp. 73–87, (2014).

7. McMahon, M., "Thermal Core Technology White Paper Series A Tale of Two Thermals□: Capillary & Immersible Introduction", webpage, https://www.coursehero.com/file/27763356/A-Tale-of-Two-Thermalsdoc/ acessed 21/1/2017.
8. Komiya, K. Higuchi, F. and Ohtani, K., "Characteristics of a thermal gas flowmeter", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 59, No. 3, pp. 477-479, (1988).
9. Hinkle, L.D., "Toward understanding the fundamental mechanisms and properties of the thermal mass flow controller", *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 9, 2043 (1991); https://doi.org/10.1116/1.577452*
10. Kim, S.J. and Jang, S.P., "Experimental and numerical analysis of heat transfer phenomena in a sensor tube of a mass flow controller", Vol. 44, pp. 1711–1724, (2001).
11. Han, I.Y. Kim, D.-K. and Kim, S.J., "Study on the transient characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, No. 13, pp. 2583–2592, (2005).
12. Kim, D.-K. Han, I.Y. and Kim, S.J., "Study on the steady-state characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 50, No. 5–6, pp. 1206–1211, (2007).
13. Kim, T.H., Kim, D.-K. and Kim, S.J., "Study of the sensitivity of a thermal flow sensor", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 52, No. 7–8, pp. 2140–2144, (2009).
14. Viswanathan, M., Rajesh, R. and Kandaswamy, A., "Design and development of thermal mass flowmeters for high pressure applications", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 13, No. 3, pp. 95–102, (2002).
15. Sazhin, O., "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 30, pp. 60–65, (2013).
16. Sazhin, O., "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. II. Flow meter, test procedures and results", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 35, pp. 48–54, (2014).
17. Baker, R.C. and Gimson, C., "The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 12, No. 2, pp. 113–121, (2001).
18. Bartos, F.J., "Tame flow disturbances with the thermal massflow meter", *Control Eng. Int.*, pp. 54–55, September (1995).
19. Viswanath, R.P., Viswanathan, B. and Sastri, M.V.C., "Kinetics of reduction of Fe2O3 to Fe3O4 by the constant temperature differential thermal analysis method", *Thermochim. Acta*, Vol. 16, No. 2, pp. 240–244, (1976).
20. Cappa, P. Del Prete, Z. and Marinozzi, F. "Experimental analysis of a new strain-gage signal conditioner based on a constant-current method", *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 55, No. 2–3, pp. 173–178, (1996).
21. Graebel, W., *Advanced Fluid Mechanics, 1st edition |ISSN 978-0-12-370885-4 | Academic Press*, (2007).
22. Olin, J.G., "Capillary Tube Thermal Mass Flow Meters & Controllers, A User ' s Guide", (2013).
23. Beronich, E.L., Abdi, M.A. and Hawboldt, K.A., "Prediction of natural gas behaviour in loading and unloading operations of marine CNG transportation systems", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 1, No. 1–2, pp. 31–38, (2009).
24. Kline, S.J. and McClintock, F.A., "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 3–8, (1953).